

УДК 681.518.54:621.313

*Кучерук В.Ю., д.т.н., професор  
професор кафедри інформаційних  
технологій УНУС, професор кафедри  
комп'ютерних наук і економічної кібернетики  
Вінницького національного аграрного  
університету*

*Кулаков П.І., д.т.н., професор  
професор кафедри інформаційних  
технологій УНУС*

*Кулакова А.П., студентка 2 курсу  
магістратури спеціальності 152 «Метрологія  
та інформаційно-вимірювальна техніка»  
ВНТУ*

## **КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН**

*Уманський національний університет садівництва, м. Умань*

**Постановка проблеми.** До моментних характеристик електричних машин (ЕМ) згідно рівняння моментів відносяться динамічний момент, момент інерції ротора, момент механічного опору на валу. Момент інерції ротора ЕМ – один із важливих ДП, який визначає його динамічні властивості [1], оскільки він є невід'ємною складовою при визначенні динамічного моменту  $M_d(t) = M_{em}(t) + M_0(t)$  ( $M_{em}(t)$ ,  $M_0(t)$  - залежності електромагнітного моменту та моменту механічного опору від часу відповідно) та динамічної механічної характеристики  $M_d(\omega_r)$ , де  $\omega_r$  - кутова швидкість ротора ЕМ. Але у довідниках на ЕМ він не завжди вказується. Крім того, у відповідності із ДЕСТ 16264.0-85 момент інерції ротора може мати великі відхилення від номінального значення ( $\pm 10\%$ ). При проектуванні різноманітних електроприводів і систем автоматики, виробництві ЕМ розробників часто цікавлять точні значення моменту інерції ЕМ (а іноді і в зборі з виконавчими механізмами), оскільки вони визначають швидкодію і тепловий режим роботи ЕМ. Визначити момент інерції ротора чи всього вузлу, що обертається, можна розрахунковим та експериментальним шляхом. Розрахунки моменту інерції ЕМ є кропіткими і трудомісткими із-за неоднорідності матеріалів та складної геометричної форми ротора ЕМ і не відзначаються високою точністю.

Відповідно до цього, метою даної роботи є визначення законів змінення кутової швидкості ЕМ в режимі самогальмування, що дає змогу суттєво підвищити точність визначення моменту інерції роторів ЕМ за рахунок

усунення операція цифрового диференціювання експериментальних даних  $d\omega_r/dt$ .

**Основні результати.** В режимі самогальмування кутова швидкість знаходиться із розв'язку диференціального рівняння руху ротора

$$J \cdot d\omega_r/dt = -M_0(\omega_r). \quad (1)$$

Для опису залежності моменту сил опору від параметрів руху використовується узагальнена модель самогальмування ротора [2]:

$$M_0(\omega_r) = M_n + (M_{ном} - M_n) \left( \frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right)^n, \quad (2)$$

де  $n$  – показник, що залежить від конструкції механізму;  $n = 1 \div 2$ .

При  $n=1$  аналітичний розв'язок рівняння (1)

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = - \left[ M_n + (M_{ном} - M_n) \left( \frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right) \right] \quad (3)$$

матиме вигляд

$$\omega_r(t) = \frac{\omega_{ном}}{M_{ном} - M_n} \cdot \left( M_{ном} \cdot e^{-\frac{M_{ном} - M_n}{J \omega_{ном}} t} - M_n \right), \quad \omega_r(t) \in [\omega_{ном} \dots 0]. \quad (4)$$

При  $n=2$  аналітичний розв'язок рівняння (1)

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = - \left[ M_n + (M_{ном} - M_n) \left( \frac{\omega_r}{\omega_{ном}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

матиме вигляд

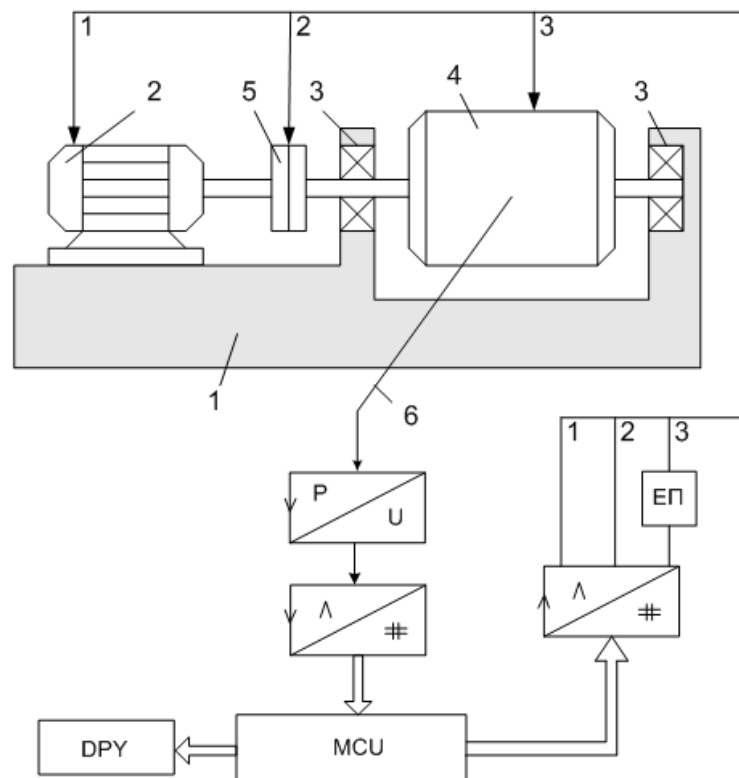
$$\omega_r(t) = -\omega_{ном} \sqrt{\frac{M_n}{M_{ном} - M_n}} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{M_n (M_{ном} - M_n)}{\omega_{ном} J} - \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{M_{ном} - M_n}{M_n}} \right) \right), \quad \omega_r(t) \in [\omega_{ном} \dots 0]. \quad (6)$$

За допомогою аналітичних перетворень розв'язків диференціального рівняння (1) для моделі (2) можна отримати вирази для моменту інерції ротора  $J$ . Всі отримані вирази зведені в таблиці. Значення моменту інерції  $J$  усереднюються на розглядуваному проміжку часу  $t$  або кутова швидкість  $\omega_r(t)$  перераховується в кут повороту ротора  $\alpha_r(t)$  і знаходяться  $J(\alpha_r)$ .

Для визначення залежності  $M_0(\omega_r)$  використовується комп'ютерна система, зображена на рис. 1. Пристрій вміщує основу 1, на якій закріплений об'єкт дослідження (ОД) 2 і балансірно в підшипниках 3 привідний асинхронний двигун 4. Вали ОД і привідного двигуна можуть з'єднуватися і роз'єднуватися електромагнітною муфтою 5, яка жорстко встановлена на вихідному валі привідного двигуна 4. Сенсор зусилля 6 з'єднаний за допомогою вимірювального важеля 7 із статором привідного двигуна 4. Комп'ютерна система включає в себе мікроконтролер MCU, цифро-аналоговий перетворювач, електропривід ЕП, сенсор зусилля. Частотно-регулюючий електропривід ЕП дозволяє проводити зміну кутової швидкості обертання  $\omega_r \in [0 \dots \omega_{ном}]$  привідного двигуна 4. Як привідний двигун 4 використовується асинхронний двигун. Мікроконтролер MCU через цифро-аналоговий перетворювач керує з'єднанням та роз'єднанням напівмуфт електромагнітної муфти 5; через електропривід ЕП змінює частоту обертання привідного двигуна 4; через сенсор зусилля проводить вимірювання моментів. Принцип дії ілюстрований на рис. 2.

Таблиця. Формули для визначення моменту інерції

Модель самогальмування	Момент інерції
4. Узагальнена (n=1):	$\hat{J} = \frac{(M_{\text{НОМ}} - M_{\Pi})}{\ln \left( \frac{M_{\text{НОМ}}}{\frac{\omega_r(t)}{\omega_{\text{НОМ}}} (M_{\text{НОМ}} - M_{\Pi}) + M_{\Pi}} \right)}$
5. Узагальнена (n=2):	$\hat{J} = \frac{M_{\Pi}(M_{\text{НОМ}} - M_{\Pi})t}{\omega_{\text{НОМ}} \cdot \arctg \left( \frac{\omega_r(t) - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_r(t) \sqrt{\frac{M_{\text{НОМ}} - M_{\Pi}}{M_{\Pi}}} + \omega_{\text{НОМ}} \sqrt{\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{НОМ}} - M_{\Pi}}}} \right)}$

Рис. 1. Структурна схема комп'ютерної системи визначення залежності  $M_0(\omega_r)$ 

Перший крок. ОД 2 знеструмлений і механічно не зв'язаний із валом привідного двигуна 4. Обертання привідного двигуна 4 у всьому діапазоні  $\omega_r \in [0 \dots \omega_{\text{НОМ}}]$  на протязі часу  $t \in [0 \dots t_1]$  при роз'єднаній електромагнітній муфті 5. При цьому на роботу пристрою впливають дисипативні сили  $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$  (сума сил тертя в підшипниках привідного двигуна 4 і в підшипниках 3). Ці сили  $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$  створюють момент опору  $M_1(\omega_r) = M_{\Pi Д}(\omega_r)$  відносно вісі ротора привідного двигуна 4, який передається на його статор і за допомогою вимірювального важеля 7 з довжиною плеча  $L$  діє на

сенсор зусилля. На виході останнього з'являється напруга, пропорційна силі опору  $\Delta Q_{C1}(\omega_r)$ , яка через аналого-цифровий перетворювач записується у пам'ять мікроконтролера.

Другий крок. З'єднання напівмуфт електромагнітної муфти 5 при  $t \in [t_1 \dots t_2]$  і очікування кінця перехідного процесу.

Третій крок. ОД 2 знеструмлений і механічно зв'язаний із валом привідного двигуна 4. Обертання привідного двигуна 4 у всьому діапазоні  $\omega_r \in [\omega_{\text{ном}} \dots 0]$  на протязі часу  $t \in [t_2 \dots t_3]$  при з'єднаній електромагнітній муфті 5. При цьому на роботу пристрою впливають дисипативні сили  $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$  (сума сил тертя в підшипниках привідного двигуна 4, в підшипниках 3 і моменту опору ОД). Ці сили  $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$  створюють момент опору  $M_1(\omega_r) = M_{\text{ПД}}(\omega_r) + M_0(\omega_r)$  відносно вісі ротора привідного двигуна 4, який передається на його статор і за допомогою вимірювального важеля 7 з довжиною плеча  $L$  діє на сенсор зусилля. На виході останнього з'являється напруга, пропорційна силі опору  $\Delta Q_{C2}(\omega_r)$ , яка через АЦП записується у пам'ять мікроконтролера.

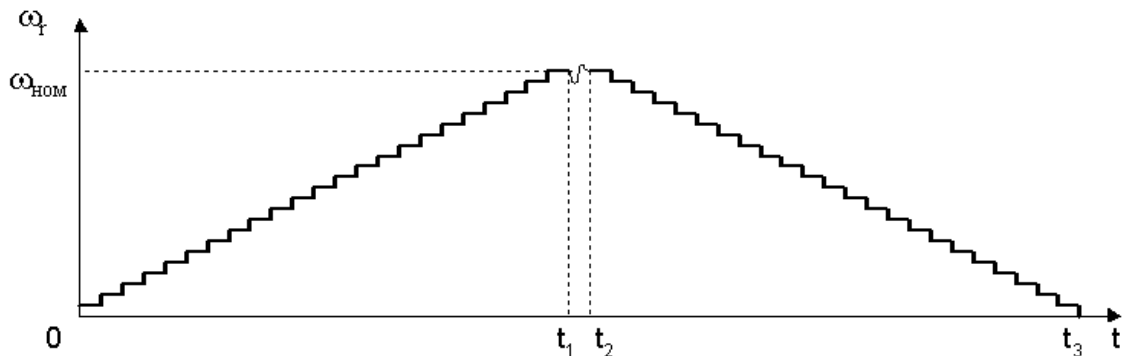


Рис. 2. До пояснення визначення залежності  $M_0(\omega_r)$

Для виключення похибок, пов'язаних із нерівномірністю швидкості обертання валу привідного двигуна 4, проводиться  $n$  вимірювань і усереднення сил  $\Delta Q_{C1 i}(\omega_r)$ ,  $\Delta Q_{C2 i}(\omega_r)$  за період квантування  $i$ . Ці значення записуються у пам'ять мікроконтролера.

По закінченні вимірювань проводяться обчислення залежності  $M_0(\omega_r)$

$$M_0(\omega_r) = M_2(\omega_r) - M_1(\omega_r). \quad (18)$$

**Висновки.** Для вимірювання моменту інерції запропоновано використовувати наперед визначену залежність моменту опору від кутової швидкості. На відміну від існуючих, даний метод не потребує використання операції диференціювання кутової швидкості, що дозволяє суттєво підвищити точність визначення моментних характеристик.

### Список літературних джерел

1. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1985. – 248с.
2. Podzharenko V.A., Kucheruk V.Yu. Computer-Measuring System of the Mechanical Characteristics of Electrical Drives// Int. Conf. «Electrical Drives and Power Electronics» EDPE'96.- Proceeding volumes 2.- High Tatras (Slovakia).- P.633-637.